

路面雪氷予測モデル

福井大学工学部	福原輝幸
福井大学大学院	藤本明宏
水工工学研究所	渡邊 洋

1. はじめに

近年、益々積雪地と非積雪地間の交通アクセスの需要は高まり、道路利用者は積雪地域においてより安全で快適な交通を求めている。このような交通のボーダーレス化に伴って、雪道に不慣れなドライバーには、今まで以上に冬期の変り易い気温や局所的な道路気象の変化などによって、圧雪および凍結などの滑り易い路面が発生しやすいことを認識知らしめるとともに、危険な路面の新たな回避策の開発が必要となる。

滑り易い路面の回避策である凍結防止剤の散布は、気象庁から得られる気象予報データや道路ITVカメラによって撮影される現在道路情報を基に、その規模や時期を決定しているが、作業員の経験に依るところもある。散布量は北海道の国道では、平成6年から15年の10年の間に散布量が7.2倍に増えている¹⁾。この原因は、雪寒事業や道路サービスの向上などが挙げられるが、安全性を重視するが故に、過剰に散布することも考えられる。

一方で、上述したように道路利用者のより高いサービス水準に答えるために、最近ではITSなどの道路情報ネットワークを取り巻く技術が着実に整備されつつあり、渋滞情報等の交通情報が提供されている。しかしながら、路面の危険性に関する将来情報は、十分に提供できているとは言い難い。路面の危険性に関する将来情報は、道路利用者にとって、積雪や凍結時に移動時間や出発時刻の目安となるとともに、道路利用者が路面の危険性を前もって認識することで、安全性の向上にも寄与すると考える。このような背景から、冬期道路の安全性と路面管理の経済性を両立させるために、信頼性の高い路面雪氷予測モデル(以下、路面雪氷モデルと呼称)が必要である。

本文では、既往の路面雪氷モデルに関する研究例を紹介するとともに、従来あまり議論がなされてこなかった通過車両熱が道路雪氷に及ぼす影響について述べる。

2. 路面雪氷モデル

2.1 予測手法

路面雪氷モデルの手法は、統計的手法と熱収支手法に分けられる。

A) 統計的手法

統計的手法は、気象台・道路テレメータなどで観測された複数の気象因子から相関関数法、重回帰分析、パターン解析、ニューラルネットワークなどを利用して、任意地点、あるいは路線の凍結発生を統計学的に予測するアプローチである。表-1は既往の統計的手法の一覧を示す。この手法は、市販のソフトを用いて比較的容易に解析ができるという利点がある。この手法の基本的な問題点としては、(i)気象の急変に対して精度が悪い、(ii)汎用性に欠け、他地域では使用できない、(iii)凍結の発生機構および凍結防止剤の融氷機構はブラックボックスのまま、が挙げられる。

B) 熱収支手法

熱収支手法は路面雪氷を横切る熱フラックスを物理量として定量的に評価し、雪氷状態を予測する方法である。この手法は地域性に依存しないモデルを構築できる点に優位性があるものの、多くの入力因子を定量的に把握

表－1 既往の統計的手法

	判別関数(分析)法	パターン解析
手法	複数の気象因子と交通条件などを説明変数とし、過去のデータから凍結・圧雪を説明する判別式を構築する。その判別式により、現在および将来の気象条件がどの群(凍結、圧雪、湿潤、乾燥等)に所属するかを判定する手法	天候別に路面温度の変動を作成し、天気予報を利用して、路面温度を予測する手法
研究機関	建設省土木研究所新潟試験所 ⁵⁾ 防災科学技術研究所 ⁶⁾ 北斗・横河電子雪対策 P.J.T ⁷⁾ 日本道路公団試験研究所 ⁸⁾	北海道学園大学 ⁹⁾ (独)防災科学技術研究所 ¹⁰⁾
	重回帰分析	ニューラルネットワーク
手法	複数の時刻の気温などを説明変数とした回帰式を作成し、日最低・最高気温を求める手法	脳の情報処理機構を数学的に模擬したモデル
研究機関	日本道路公団試験研究所 ⁸⁾ 日本気象協会北陸センター ¹¹⁾ 北陸地方整備局長岡国道工事事務所 ¹²⁾	北海道大学 ¹³⁾ 日本大学 ¹⁴⁾ Department of Electronics, Polytechnic of Turin ¹⁵⁾

表－2 予測対象と予測方法の現状

路面温度	路面温度の日変化曲線や数時間先の路面温度を予測し、路面温度が 0℃以下になる時刻を凍結開始時刻とする。さらに、天気予報を基に、路面上の水分の有無を予測したり、水分検知機器を路面表面に設置し、予測精度を高める試みも行われている。
路面状態	統計的手法では乾燥、圧雪、湿潤、シャーベット、氷膜などに路面状態を分類した上で、数時間先の路面状態を判別する。他方、熱収支モデルに関しては、水分検知機器または統計的手法との組み合わせで路面状態を分類する報告は見られるものの、依然として物理学的に路面状態を予測する手法を確立されていない。
μ	既往の研究では、中辻らによるニューラルネットワークを利用して μ を評価した報告 ¹³⁾ と Jonas Norrman ¹⁶⁾ による判別分析法を利用して滑り易さと事故率の関係を定量的に評価した報告がある。直接、 μ を算出する解析はなく、事前に雪氷物性と μ の関係を明らかにしておく必要がある。

する必要がある、簡単に扱うことができないという問題点がある。

入力因子は内的因子と外的因子の 2 種類に大別され、前者として地中熱および舗装構造やそれらの熱物性値などが挙げられる。また、後者として自然的因子と人的因子があり、前者は気象と地形などが、後者は通過車両、凍結防止剤の散布、機械除雪など、がそれぞれ該当する。既往の研究では、石川ら²⁾および藤本ら^{3), 4)}が通過車両熱が原因となる路面雪氷の融解・再凍結現象について、興味深い報告を行っている。いずれにせよ、路面上を通過する車両の熱的な影響を加味する場合、①車両底面からの輻射熱、②車両タイヤからの熱伝達、③車両通過に伴い励起される空気移動の顕熱、が考えられる。しかしながら、これらを定量化した知見は少なく、そのために通過車両の熱的影響が道路雪氷の性状変化に及ぼす影響は、依然として不明な点が多い。

2.2 予測の対象

路面雪氷モデルの出力は、路面温度、路面状態および路面すべり摩擦係数(以下、 μ と呼称)が考えられる。表－2 は路面雪氷モデルの予測対象およびその一般的な方法とその現状を示す。

路面雪氷モデルを構築する意義は 1.でも触れたが、適切な凍結防止剤の散布時期と散布量を決定すること、

路面状態の将来情報を予測し、ITS などを利用した情報提供により、道路利用者レベルの向上を促すこと、などにある。従って、路面雪氷モデルは凍結防止剤散布後の路面状態、さらには μ を評価できるモデルであることが望ましい。路面温度予測のみでは、湿潤、圧雪、シャーベット、氷板など多様に变化する冬期路面の危険性或凍結防止剤の散布方法を十分に説明し難い。

現在、路面雪氷状態は、木下ら^{17)、18)}、青木ら¹⁹⁾、前野ら²⁰⁾、松沢ら²¹⁾、秋田谷ら²²⁾などが提案した道路雪氷分類法によって分類されている。しかしながら、これらの分類はいずれも目視によって路面状態を判別する方法であり、判別結果が観測者の主観によって、異なりやすいという難点を抱える。従って、路面の危険性をより客観的に把握するためには、 μ が適していると考ええる。なお、路面の μ と雪氷物性との関係については、MASS(Multi-Axial Sensing System)車を用いた報告²³⁾を参照されたい。

凍結防止剤散布が路面雪氷に及ぼす影響は、気温や路面温度によって大きく左右され、散布によって複雑な温度挙動が現れる可能性がある。しかしながら、凍結防止剤が溶液化するときの吸熱あるいは発熱反応、氷の融解潜熱や凝固点降下などの物理・化学現象を定式化すれば、濃度および温度の変化を定量的に評価できると考える。そのため、現時点では凍結防止剤の影響を加味するには、統計的手法よりもむしろ熱収支手法の方が適していると思われる。

なお、冬期道路管理における凍結防止剤散布の知見は、村国らの報告^{24)~26)}が参考になる。

3. 車両通過の熱的影響

タイヤ圧雪層一舗装間の伝熱特性を調べてきた成果^{3)、4)}を基に、車両熱が路面の温度および熱収支に寄与する特性について紹介する。

3.1 解析条件

本解析は、新潟県妙高高原町二俣地先一般国道18号(標高:約500m)に設置された観測機器²⁷⁾から得られた2004年12月25日の24時間の気象・地盤データを参考とした。交通量は図-1に示すように、同地点の交通観測データを基に、交通量が多い7時~21時の時間帯および交通量が少ない残りの時間帯におけるそれぞれの平均値を用いて、前者の交通量(Q_v)を320台/hに、後者の Q_v を70台/hに、単純化した。また、車両の通過速度(V_v)は5、20、40および60km/hの4ケースに選んだ。

3.2 路面温度

図-2は走行速度の極端な比較として、Case5($V_v=5\text{km/h}$)およびCase60($V_v=60\text{km/h}$)における道路表面温度 T_{pc5} (Case5)および T_{pc60} (Case60)の経時変化をそれぞれ示す。前者は交通渋滞時や交差点付近の低速走行時、後者は通常走行時に対応すると考えてよい。

T_{pc5} (破線)および T_{pc60} (実線)は8時頃に日射の影響を受けて急激に上昇し、2時頃にピークとなり、その後低下する。 T_{pc5} と T_{pc60} を比較すると、日射の影響を強く受ける時間帯(11時~15時)では、 $T_{pc5} < T_{pc60}$ となる。例えば、13時頃では T_{pc60} は T_{pc5} より2.0℃程度高い。この要因は遮蔽時間率に起因した日射量と車両からの熱供給(車両

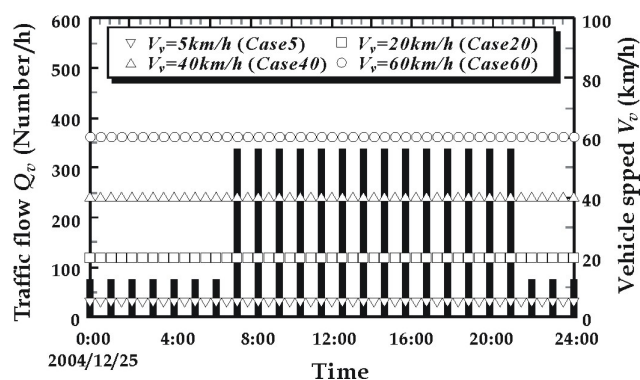
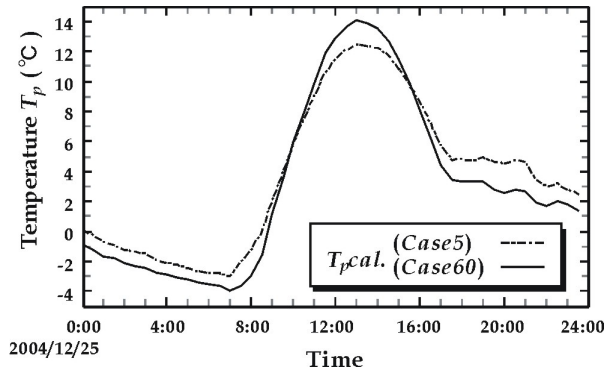
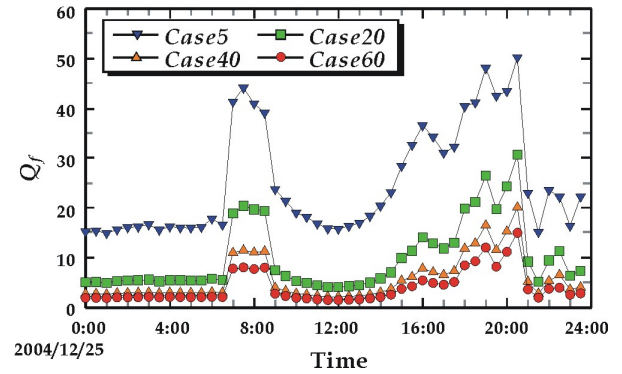


図-1 1時間当りの交通量および平均速度の経時変化



図－２ 気温、道路表面温度の実測値と計算値
(Case5 および Case60)



図－３ 道路表層を出入りする熱収支成分の絶対値の
合計に対する車両通過による熱供給の割合

熱フラックス)の相違に関係する。ここで、車両熱フラックスとは車両通過に伴う車両底面からの輻射熱フラックス(R_v)と車両通過のタイヤ熱に伴う熱伝達フラックス(S_t)の和を、遮蔽時間率とは任意地点で単位(1)時間あたりに車両がその地点を占有している時間の比率を、それぞれ意味する。遮蔽時間率は、Case5 の交通量の多い($Q_v=320$ 台/h)時間帯で 0.29、交通量の少ない($Q_v=70$ 台/h)時間帯で 0.07、Case60 の $Q_v=320$ 台/h で 0.03、 $Q_v=70$ 台/h で 0.01 となる。このように、通過速度と台数によって遮蔽時間率が異なり、車両が任意地点を占有している間は路面への日射量は 0 となるが、代わりに車両熱が路面に供給される。遮蔽時間率を加味した日射と車両熱の総合熱フラックスは、ピーク時(13 時)に Case5 では 370W/m^2 、Case60 では 420W/m^2 となった。

逆に、日射の影響が少ない時間帯や夜間では、 $T_{pc5} > T_{pc60}$ となり、最大で T_{pc5} (破線)は T_{pc60} (実線)より 2.5°C 程度高い。この要因は通過車両にあり、ちなみに車両熱フラックスは Case5 で 30W/m^2 、Case60 で 5W/m^2 となる。このように、通過車両は通過台数が多いほど、通過速度が遅いほど、路面に与える車両の熱的影響は大きい。

3.3 車両通過の熱的影響

図－3 は Case5、Case20($V_v=20\text{km/h}$)、Case40($V_v=40\text{km/h}$)および Case60 における熱収支成分の絶対値の合計に対する車両熱フラックスの割合を Q_f (車両熱フラックスによる全熱フラックスへの寄与率)として示す。すなわち、

$$Q_f = \frac{|R_v| + |S_t|}{|G| + |R_{ns}| + |R_{nl}| + |S_a| + |R_v| + |S_t| + |L| + |S_f|} \quad (1)$$

ここに、 G :熱伝導フラックス、 R_{ns} :純短波放射熱フラックス、 R_{nl} :純長波放射熱フラックス、 S_a :空気移動に伴う顕熱フラックス、 L :水分の相変化に伴う潜熱フラックスおよび S_f :降雨降雪に伴う顕熱フラックスである。同図より、Case5 における Q_f (▼)は最大で 50%を占め、熱収支成分の中で重要な要因となっていることが分る。その特徴として、 Q_f は、日射成分が卓越する日中、また通過台数が少ない夜間では 20%程度であるが、日射の影響が少なくかつ交通量の多い朝および夕方では 40～50%にまで大きくなる。また、 Q_f は Case5、Case20、Case40、Case60 の順に小さくなる。

仮に、氷板路面の場合、 $Q_v=320$ 台/h における Case5 の車両熱 130W/m^2 は約 1.5kg/h/m^2 の氷の融解熱量、 1.5mm/h の融氷速度に相当する。このように、融氷が無視し得ない交通状況下の後に、車両が通過しない時間が続くと、融解した水分は再び凍結する可能性がある。すなわち、車両が低速で通過するような交差点などでは、車両熱がつるつる路面を誘発する主要因になることが十分に考えられる。

4. おわりに

冬期の路面管理の効率的および高度化の一端を担う路面雪氷モデルは、道路管理費用の削減のみならず、路面の危険性に関する将来情報を電子情報網を利用して道路利用者へ提供することで、交通安全性の向上にも期待できる。また、最適化された冬期道路管理は今後の管理に係る費用の削減に大きな効果を及ぼすと予想される。現在、路面雪氷モデルに関する研究は日本のみならず世界各国で積極的に取り組んでおり、多くのモデルが存在する。手法や考慮する影響因子は異なるものの、本来の目的は同じである。今後、路面雪氷モデルのスピード化を図るためには、開発機関間の協力が必要である。これによって、観測データの共有や合同精度検証などが促進され、日本から信頼性の高い路面雪氷モデル、さらには雪害に強い交通システムの発信が十分期待できると考える。

参考文献

- 1) 高橋尚人:雪氷路面の戦略的管理を目指してー熱収支モデルを用いた路面凍結予測手法についてー、ゆき、No. 60、pp. 35-41、2005.
- 2) 石川信敬・成田英器・加治屋安彦:凍結路面の発生メカニズムに関する熱収支的考察、寒地技術論文・報告集、Vol. 16、pp. 382-388、2000.
- 3) 武士俊也・福原輝幸・横山孝男・渡邊洋・林健一・藤本明宏:熱収支法による路面凍結解析ー車両タイヤ-圧雪層-路面間の熱移動ー、寒地技術論文・報告集、Vol. 18、pp. 71-76、2002.
- 4) 渡邊洋・藤本明宏・福原輝幸:通過車両から路面への熱供給に関するモデリング、寒地技術論文・報告集、Vol. 21、pp. 195-200、2005.
- 5) 田中光一・石平貞夫:凍結・圧雪発生予測手法の開発について、ゆき、No. 21、pp. 37-41、1995.
- 6) 西村浩一・平島寛行・小杉健二・小林俊市・佐藤威・佐藤篤司:道路雪氷の広域予測に関する研究Ⅰ、寒地技術論文・報告集、Vol. 20、pp. 122-127、2004.
- 7) 沼田実・伊藤驍・岩浪守・河村容輔・岡本純・田代亨・後藤律子:短期路面凍結予測に関する新しい手法の検討、寒地技術論文・報告集、Vol. 19、pp. 147-151、2003.
- 8) 鈴木立実・天野和祐・平間照一:路面凍結予測手法に関する研究、ハイウェイ技術、No. 1、pp. 22-29、1995.
- 9) 武市靖:路面凍結の予測に関する研究、土木学会論文集、No. 470、pp. 175-184、1993.
- 10) 中村勉:交通路における雪氷防災情報システムの開発に関する研究の概説、防災科学技術研究所研究報告、No. 52、pp. 81-105、1993.
- 11) 須田公男・水嶋正二・赤川正臣:一般国道8号、17号の路面凍結予測について、日本雪氷学会誌、第3号 pp. 155-163、1988.
- 12) 舟田久之:道路凍結と降雪の予測、地学雑誌、101(6)、pp. 491-505、1992.
- 13) 山川顕吾・花岡真也・小野寺勇輝・中辻隆:ニューラル・カルマンフィルターを用いた冬期路面摩擦係数の予測と推定、寒地技術論文・報告集、Vol. 12、pp. 189-194、1996.
- 14) 堀井雅史・加藤清也・福田正:ニューラルネットワークを用いた冬期道路の舗装路面温度予測モデル、土木学会論文集、No. 620/V-43、pp. 271-278、1999.
- 15) Eros Pasero et al.: Neural Meteorological Forecast、12th International Road Weather Conference、2004.
- 16) Jonas Norrman: Classification of road slipperiness、10th SIRWEC Conference、pp. 71-77、2000.

- 17) 木下誠一・秋田谷英次:北海道における路面積雪調査Ⅰ、低温科学、物理偏、27、pp. 163-179、1969.
- 18) 木下誠一・秋田谷英次・田沼邦雄:道路上の雪氷の調査Ⅱ、低温科学、物理偏、28、pp. 311-323、1970.
- 19) 青木忠男・下村忠一・石平貞夫・金子英雄・櫛彦二郎:雪氷対策調査(1)、建設省土木研究所資料、1306 号、pp. 1-64、1977.
- 20) 前野紀一・成田英器・西村浩一・成瀬廉二:道路雪氷の構造と新分類、低温科学、物理偏、46、pp. 119-133、1987.
- 21) 前沢勝・加治屋安彦・荒井秀方・川端隆:93/94 全道冬期路面状況調査について、寒地技術論文・報告集、No. 10、pp. 70-75、1994.
- 22) 秋田谷英次・山田知充:目視による道路雪氷の分類と活用、寒地技術論文・報告集、No. 10、pp. 63-69、1994.
- 23) 藤本明宏・渡邊 洋・福原輝幸・武士俊也・小林一治・宮崎長生・小川明子・浅野基樹:MASS 車によるすべり摩擦と道路雪氷との関係、日本雪工学会誌、Vol. 21、No. 5、pp. 282-291、2005.
- 24) 村国誠:冬期路面管理に使用する薬剤 (1) 薬剤の種類と物理・化学的性質、ゆき、No. 10、pp. 68-75、1993.
- 25) 村国誠:冬期路面管理に使用する薬剤 (2) 薬剤の事前散布効果、ゆき、No. 11、pp. 87-94、1993.
- 26) 村国誠:冬期路面管理に使用する薬剤 (3) 薬剤の融雪メカニズム、ゆき、No. 12、pp. 97-103、1993.
- 27) 荒川智之・渡邊洋・福原輝幸・林健一・市ノ瀬榮彦:熱収支法による路面凍結解析—乾燥、湿潤および積雪路面における熱的挙動—、寒地技術論文・報告集、Vol.16、pp. 389-395、2000.